جوشکاری همزن اصطکاکی مونل ۴۰۰: بررسی ریزساختار، زیرساختار و خواص مکانیکی*

مقاله علمی – پژوهشی

اکبر حیدرزاده[۱]

چکیده

در این تحقیق، خواص ناحیه جوش همزن اصطکاکی مونل ۴۰۰ شامل ریزساختار، زیرساختار و سختی مورد بررسی و مقایسه با فلز پایه قرار گرفت. برای این منظور، ورق مونل ۴۰۰ به ضخامت ۲ میلیمتر تحت جوشکاری همزن اصطکاکی در سرعت چرخش ابزار ۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ابزار ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه قرار گرفت. برای آنالیز ریزساختار و مرزدانه ها در نواحی فلز پایه و ناحیه جوش از آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی و برای بررسی زیرساختار از میکروسکوپ الکترونی عبوری بهره گرفته شد. همچنین، برای اندازه‌گیری سختی از آزمون میکروسختی استفاده گردید. نتایج نشان دادند که ریزدانه شدن، افزایش چگالی نابجایی و افزایش فاکتور تیلور، عوامل اصلی در بهبود سختی ناحیه جوش می‌باشند.

واژه‌های کلیدی مونل، جوشکاری همزن اصطکاکی، ریزساختار.

Friction Stir Welding of Monel 400: Microstructure, Substructure, and Mechanical Properties

A. Heidarzadeh

Abstract

In this study, the microstructure, substructure and hardness of the friction stir welded Monel 400 were investigated and compared with those of the base metal. For this purpose, the Monel 400 plates were friction stir welded at a tool rotational speed of 400 rpm, and a tool traverse speed of 100 mm/min. For characterizing the microstructure and grain boundaries in base metal and stir zone, the electron backscattered diffraction was utilized. The transmission electron microscopy was used for studying the substructures. In addition, microhardness test was conducted to hardness measurement. The results showed that the grain refinement, increasing in dislocation density and Taylor factor were the main reasons of the higher hardness of the stir zone.

Key Words Monel, Friction Stir Welding, Microstructure.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/٤/۱۲ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

Email: ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir

DOI: 10.22067/ma.v31i2.68236

مقدمه

آلیاژ مونل ٤٠٠، به عنوان یکی از مهمترین آلیاژهای نیکل–مس، از نظر مقاومت به خوردگی نسبت به فولادهای زنگ‌نزن مقاوم‌تر می‌باشد. مقاومت به خوردگی بالای این آلیاژ در محیط‌های متفاوت در کنار استحکام و چقرمگی خوب در بازه دمایی گسترده و شکل‌پذیری مناسب سبب شده است که از این آلیاژ در صنایع مختلف به خصوص در صنایع دریایی و ساخت تجهیزات شیمیایی استفاده گردد. بنابراین، تقاضای قابل توجهی برای اتصال و جوشکاری قطعات از جنس مونل ٤٠٠ همواره وجود داشته است [1,2].

تا کنون روش‌های مختلفی برای جوشکاری آلیاژ مونل ٤٠٠ توسط محققین پیشنهاد شده است که می‌توان به جوشکاری قوسی با الکترود تنگستنی، جوشکاری با پرتو لیزر و جوشکاری با پرتو الکترونی اشاره کرد [5-3]. تمامی روش‌-های موجود برای جوشکاری مونل ٤٠٠ از نوع روش‌های ذوبی بوده و درنتیجه ناحیه اتصال دارای ساختار انجمادی می‌باشد. ساختارهای انجمادی به دلیل دارا بودن عیوبی از قبیل جدایش درشت، جدایش ریز، حفرات گازی، حفرات انقباضی و ساختار دندریتی، باعث افت خواص مکانیکی ناحیه اتصال می‌شوند. از طرفی، حرارت ورودی بالای موجود در روش‌های ذوبی باعث به وجود آمدن ناحیه تحت تاثیر حرارت بزرگ شده که این ناحیه در اکثر مواقع به عنوان ناحیه ضعیف جوش تلقی می‌گردد. بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از روهای جوشکاری حالت جامد برای آلیاژ مونل ٤٠٠ مناسب باشد. در روش‌های حالت جامد، ساختار انجمادی، به دلیل عدم ذوب ماده، وجود نداشته و معمولا میزان حرارت ورودی بسیار کم‌تر از روش‌های ذوبی است [6-10].

روش جوشکاری همزن اصطکاکی، به عنوان یکی از روش‌های اتصال‌دهی حالت جامد، برای جوشکاری فلزات و آلیاژهای مختلف مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در جوشکاری همزن اصطکاکی یک ابزار چرخان (متشکل از پین و شانه) با سرعت چرخشی مشخص وارد درز جوش شده و با حرکت در امتداد درز جوش، اتصال را به وجود می‌آورد. در واقع، حرارت ناشی از اصطکاک ابزار و تغییر شکل پلاستیک شدید اعمال شده، باعث اختلاط و اتصال فلزات می‌شود. از متغیرهای این فرآیند می‌توان به سرعت چرخشی، سرعت پیشروی، نیروی عمودی، شکل و ابعاد هندسی ابزار اشاره کرد [14-10].

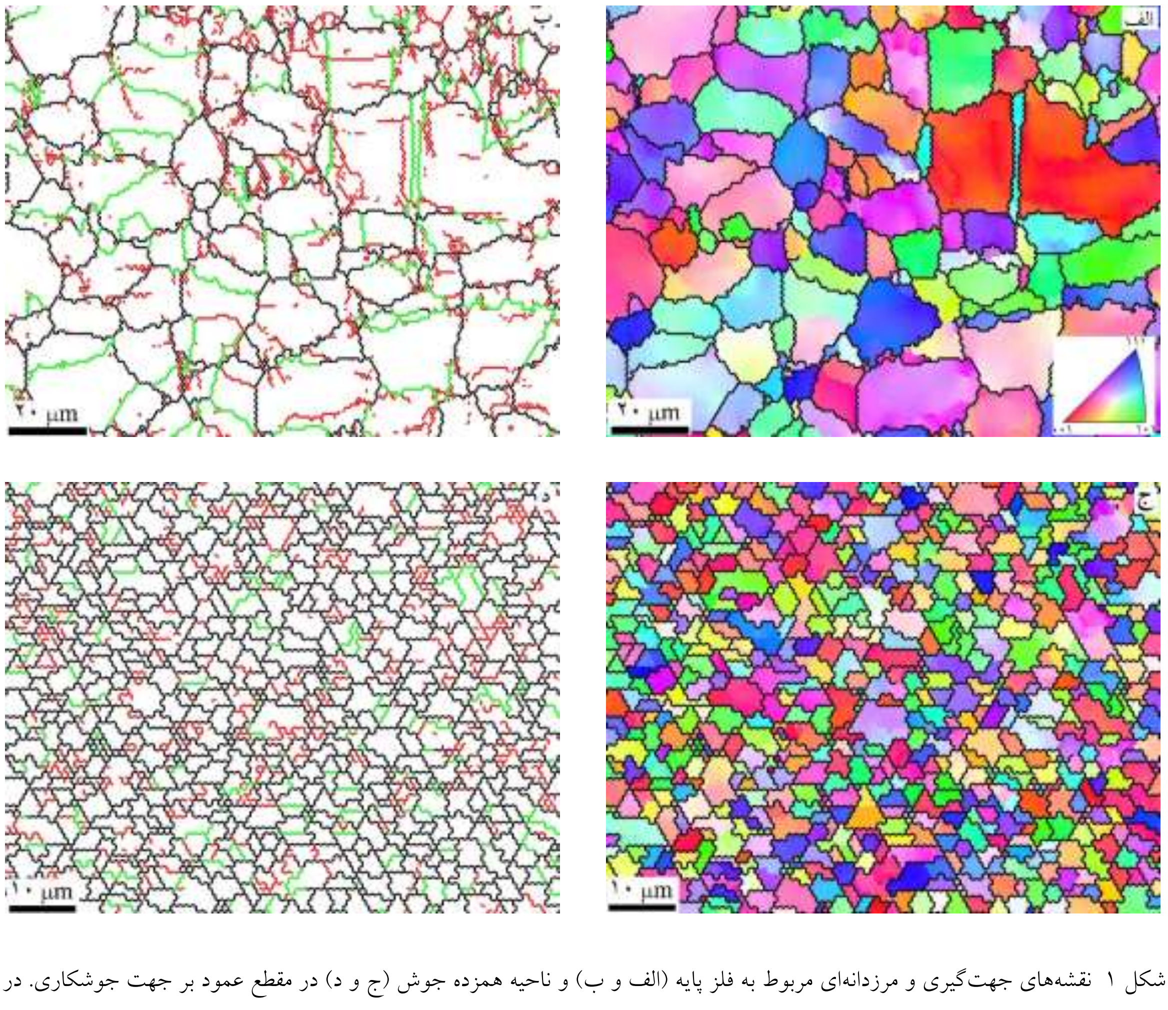
علی‌رغم تحقیقات گسترده انجام شده در زمینه جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای گوناگون، بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط نویسنده، پژوهشی در راستای جوشکاری همزن اصطکاکی مونل ٤٠٠ صورت نپذیرفته است. بنابراین، در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر جوشکاری همزن اصطکاکی بر ریزساختار، زیرساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مونل ٤٠٠ پرداخته شده است. امید است اطلاعات پایه‌ای موجود در تحقیق حاضر، بستر جدیدی برای تحقیقات آینده در زمینه اتصال آلیاژهای مونل را فراهم آورد.

روش تحقیق

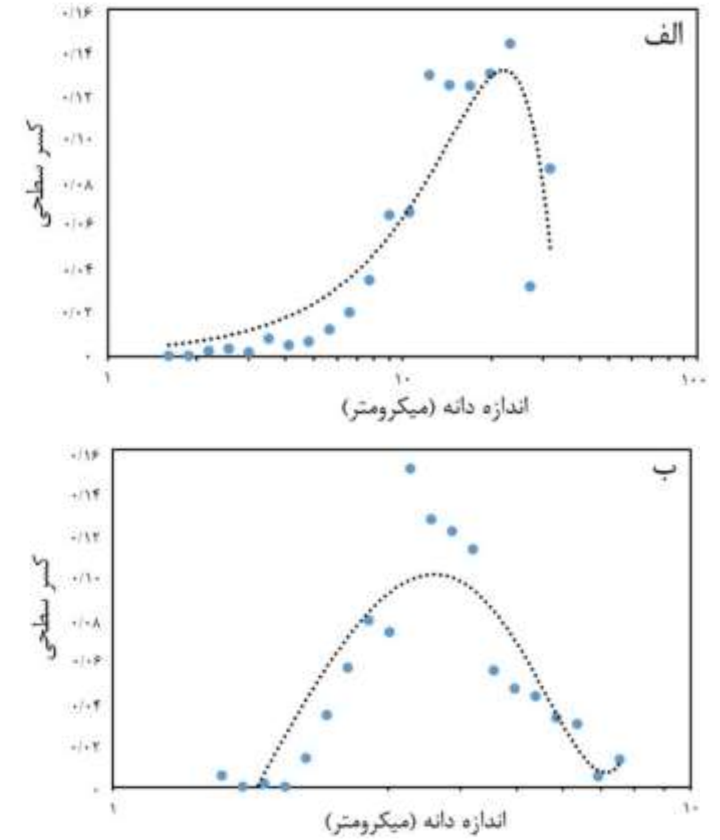
در این تحقیق، از جوشکاری همزن اصطکاکی برای اتصال ورق مونل ٤٠٠ به طول ١٠٠ میلیمتر، به عرض ١٠٠ میلیمتر و ضخامت ٢ میلیمتر و با ساختار اولیه آنیل شده استفاده شد. ابزاری متشکل از شانه (به قطر ١٢ میلیمتر) و پین استوانه‌ای ساده (به قطر ٣ و ارتفاع ١/٧٥ میلیمتر) از جنس کاربید تنگستن طراحی شد. برای انجام جوشکاری، از دستگاه فرز نیمه سنگین بهره گرفته شد. زاویه ابزار با بردار عمود بر سطح ورق ثابت و برابر ٣ درجه در نظر گرفته شد و جوشکاری به صورت بدون درز در یک پاس و در سرعت‌های چرخشی ٤٠٠ دور بر دقیقه و پیشروی ١٠٠ میلیمتر بر دقیقه انجام گردید. برای بررسی ریزساختار، بافت و مهندسی مرزدانه نواحی فلز پایه و ناحیه همزده جوش (ناحیه مرکزی جوش) از آزمون پراش الکترون‌های برگشتی استفاده به عمل آمد. زیرساختار نواحی فلز پایه و ناحیه همزده جوش به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری سختی، از آزمون میکروسختی ویکرز با بار ٥٠ g و مدت زمان ١٠ s ثانیه استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز تفرق الکترون‌های برگشتی شامل نقشه‌های جهت‌گیری، نقشه‌های مرزدانه‌ای، توزیع اندازه دانه، توزیع انواع مرزدانه‌ها، توزیع مرزهای **شبکه منطقه انطباق**، توزیع زاویه ناهمسویی و نتایج بافت فلز پایه و ناحیه مرکزی جوش می‌باشد که در شکل‌های (۴-۱) نشان داده شده‌اند. در تمامی نقشه‌های جهت‌گیری و مرزدانه‌ای مرزهای کوچک زاویه با زاویه ناهمسویی بین ۲ تا ۱۵ درجه با رنگ قرمز، مرزهای بزرگ زاویه با زاویه ناهمسویی بیشتر از ۱۵ درجه با رنگ سیاه و مرزهای شبکه منطقه انطباق با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل (۱)، در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی دانه‌های هم محور درشت به دانه‌های هم محور ریز تبدیل شده‌اند. به طوریکه اکثر دانه‌های فلز پایه دارای اندازه ۱۰ الی ۳۵ میکرومتر (شکل (۲-الف)) و دانه‌های ناحیه جوش دارای اندازه ۲ الی ۵ میکرومتر (شکل (۲-ب)) می‌باشند. ریزدانه شدن در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی را می‌توان ناشی از پدیده‌های دینامیکی دانست. با توجه به حضور همزمان تغییر شکل پلاستیک ماده و افزایش دما در حین فرآیند، پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه مرکزی همزده جوش اتفاق می‌افتند.

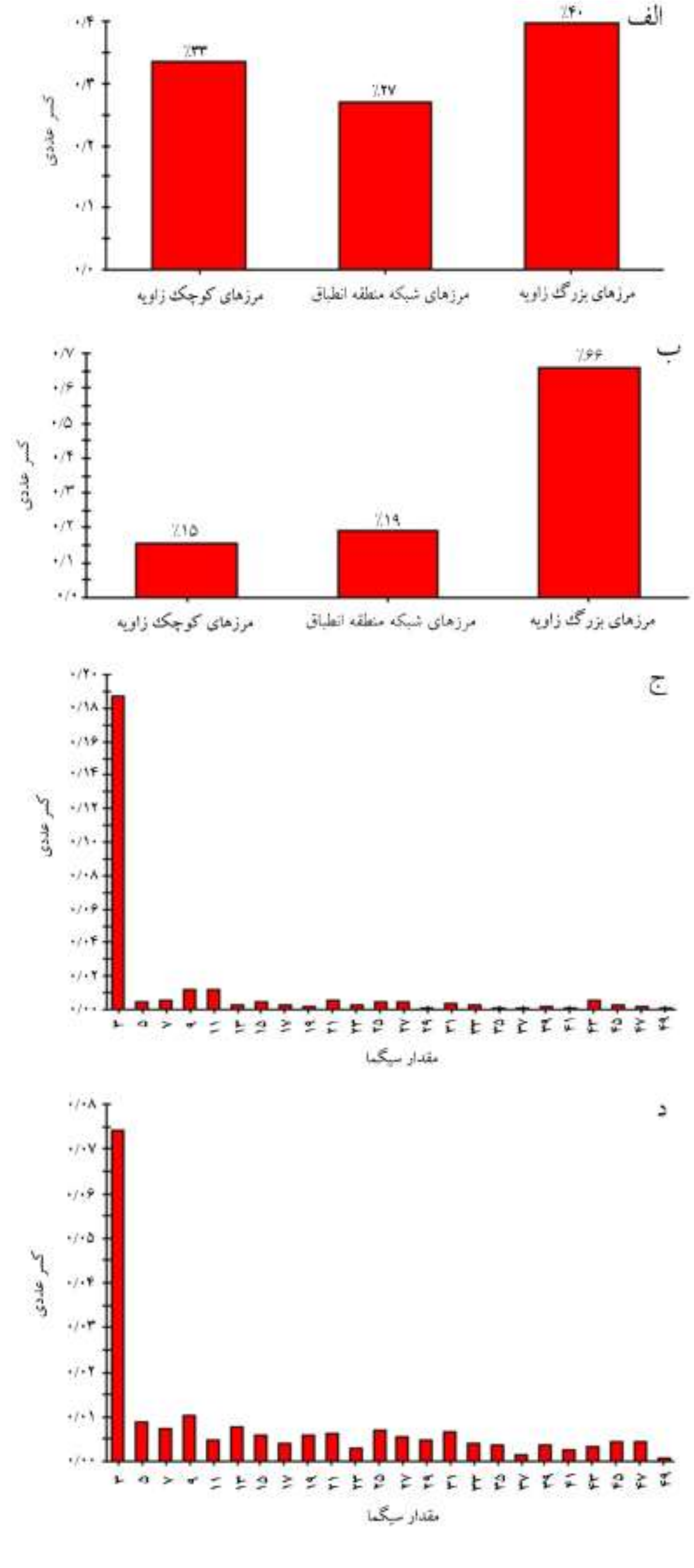


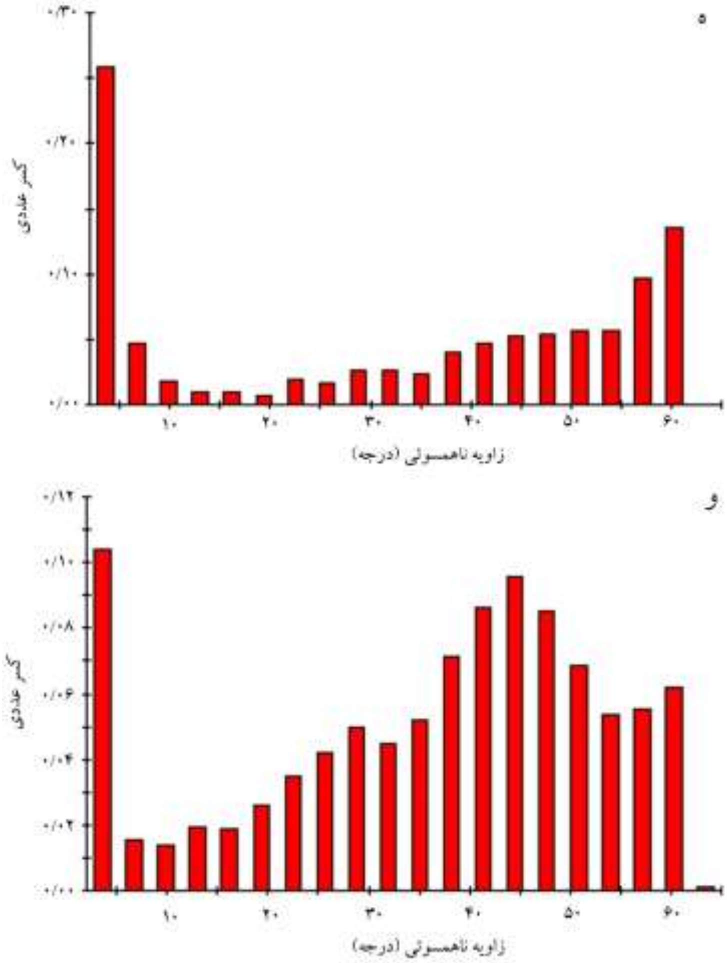
شکل ۱ نقشه‌های جهت‌گیری و مرزدانه‌ای مربوط به فلز پایه (الف و ب) و ناحیه همزده جوش (ج و د) در مقطع عمود بر جهت جوشکاری. در نقشه‌های مرزدانه‌ای، مرزهای کووچک زاویه، بزرگ زاویه و مرزهای شبکه منطقه انطباق به ترتیب با رنگ‌های قرمز، سیاه و سبز نشان داده شده‌اند. در شکل الف، مثلث راهنمای جهت‌گیری نشان داده شده است که در همه نقشه‌های جهت‌گیری مقاله مورد استفاده قرار گرفته است



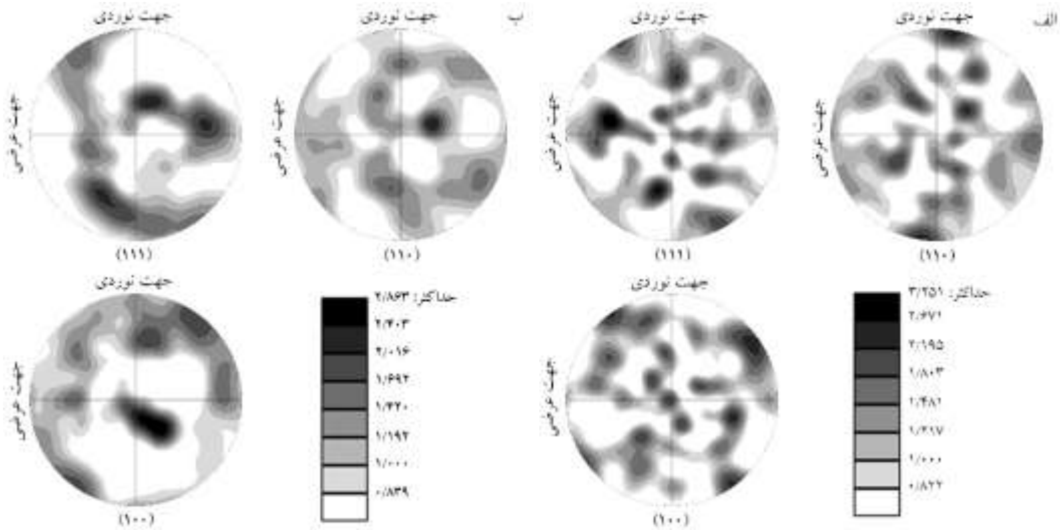
شکل ۲ (الف) توزیع اندازه دانه در فلز پایه، (ب) و ناحیه همزده جوش

با توجه به شکل (۳-الف)، فلز پایه حاوی ۳۳ درصد مرز کوچک زاویه و ٦٧ درصد مرزهای بزرگ زاویه بوده است. ۴۰ درصد مرزهای بزرگ زاویه از نوع تصادفی بوده و بقیه آن از نوع مرزهای شبکه منطقه انطباق هستند. شکل (۳-ج) نشان می‌دهد که اکثر مرزهای شبکه منطقه انطباق از نوع مرز سیگما ۳ هستند که معرف مرزهای دوقلویی می‌باشند. مرزهای سیگما ۳، در واقع بیانگر رابطه جهت‌گیری دوقلویی درجه اول در فلزات با شبکه بلوری مکعبی وجوه پر هستند که مشخصه آن‌ها چرخش ٦٠ درجه‌ای حول محور بلوری <۱۱۱> می‌باشد (شکل (۳-ه)) [15]. حضور مرزهای سیگما ۳ در ریزساختار فلزات پایه، نشان دهنده وقوع تبلور مجدد و رشد دانه در حین آنیل و آماده‌سازی آن‌ها می‌باشد. شکل (۳-ب) نشان می‌دهد که فلز جوش حاوی ۱۵ درصد مرز کوچک زاویه، ٦٦ درصد مرزهای بزرگ زاویه تصادفی و ۱۹ درصد مرزهای شبکه منطقه انطباق می‌باشد. در ناحیه همزده جوش نیز اکثر مرزهای سیگما از نوع سیگما ۳ یا مرزهای دوقلویی هستند (شکل (۳-د)). مقایسه نتایج مربوط به فلز پایه و ناحیه مرکزی جوش در شکل (۳) نشان می‌دهد که مکانیزم حاکم بر تحولات ریزساختاری باعث کاهش مرزهای کوچک زاویه و دوقلویی شده و باعث افزایش مرزهای بزرگ زاویه شده است. همچنین با توجه به توزیع زاویه ناهمسوئی (شکل‌های (۳-ه و و)) و نتایج بافت در شکل ٤، در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی توزیع زاویه ناهمسوئی به توزیع تصادفی نزدیک‌تر شده و بافت تصادفی افزایش یافته است. نکته قابل توجه دیگر در شکل (٤-الف) این هست که بافت موجود در فلز پایه دچار اندکی چرخش شده و لذا مولفه‌های آن با مولفه‌های ایده‌ال بافت تغییرشکل یا تبلور مجدد فلزات با ساختار مکعبی وجوه پر متفاوت است. دلیل این موضوع می‌تواند تقابل بافت تغییر شکل با بافت تبلور مجدد ناشی از آنیل باشد.


الف
٪۴۰
٪۳۳
٪۲۷
کسر عددی
مرزهای کوچک زاویه
مرزهای شبکه منطقه انطباق
مرزهای بزرگ زاویه
ب
٪۶۶
٪۱۵
٪۱۹
کسر عددی
مرزهای کوچک زاویه
مرزهای شبکه منطقه انطباق
مرزهای بزرگ زاویه
ج
کسر عددی
مقدار سیگما
د
کسر عددی
مقدار سیگما



شکل ۳ توزیع انواع مرزدانه‌ها، توزیع مرزهای شبکه منطقه انطباق و توزیع زاویه ناهمسوئی در فلز پایه (به ترتیب الف، ج و ه) و در ناحیه همزده جوش (به ترتیب ب، د و و)



شکل ٤ (الف) تصاویر قطبی مربوط به نواحی فلز پایه، (ب) و همزده جوش

مشخصات به دست آمده حاکی از آن هست که در حین فرآیند، مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته با مراحل مجزای جوانه‌زنی و رشد رخ داده است. مکانیزم اصلی جوانه‌زنی در تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته از طریق مکانیزم تاول زدن بوده که در آن لغزش یا برش مرزدانه‌ای و در ادامه تشکیل مرزهای دوقلویی یا فرعی انجام می‌گیرد. در این مکانیزم، در مرحله اول در نزدیکی مرزدانه‌های اصلی شیب چگالی نابجایی به دلیل ماهیت تغییر شکل غیر یکنواخت به همراه تشکیل مرزهای فرعی، باعث به وجود آمدن دندانه‌ها یا موج در مرزهای اصلی می‌شود. در مرحله دوم، در اثر لغزش یا برش مرزدانه‌ای یک نواحی پرکرنش در اطراف دندانه‌ها به وجود می‌آید که به دلیل مقاومت دندانه‌ها در برابر لغزش مرزدانه‌ای می‌باشد. به وجود آمدن نواحی پرکرنش، نیروی محرکه لازم برای تاول زدن مرز را تأمین می‌کند. در مراحل بعد، تاول به وجود آمده در مرز از طریق تشکیل مرزهای کوچک زاویه و یا مرز دوقلویی به جوانه تبدیل شده و رشد می‌کند [16-20]. همچنین در مراجع اشاره شده است که در شرایط نرخ کرنش کم و دمای تغییر شکل زیاد، جوانه از طریق تشکیل مرز دوقلویی به وجود می‌آید در حالیکه در شرایط نرخ کرنش زیاد و دمای تغییر شکل کم، از طریق تشکیل مرز کوچک زاویه به وجود می‌آید [16]. از دیدگاه بافت‌شناسی به دلیل وجود مراحل جوانه‌زنی و رشد در تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته و تشکیل دانه‌های جدید با جهت گیری متفاوت از زمینه، این مکانیزم بافت اولیه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طوریکه اکثر محققین اذعان داشته‌اند که در اثر تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته بافت تغییر شکل اولیه کاملا از بین می‌رود [16-18]. تصادفی شدن بافت در ناحیه مرکزی جوش که در شکل (٤) نشان داده شده است، احتمال وقوع تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته را در تحقیق حاضر قوت می‌بخشد.

نتایج آزمون میکروسختی نشان دادند که سختی فلز پایه و ناحیه مرکزی جوش به ترتیب ۱۷۵–۱٦۲ ویکرز و ۲۱۸–۲۰۷ ویکرز بوده است که معرف افزایش سختی در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی است. سختی را می‌توان به عنوان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک اعمالی از طرف نافذ تعریف کرد. مکانیزم‌های استحکام دهی در فلزات و آلیاژهای چندبلوری که باعث افزایش تنش برشی بحرانی روی صفحات لغزش می‌شوند شامل استحکام‌دهی ناشی از رسوبات ($\Delta\tau_{ppt}$)، استحکام دهی ناشی از محلول جامد ($\Delta\tau_{ss}$)، استحکام دهی ناشی از نابجایی‌ها ($\Delta\tau_D$)، استحکام دهی ناشی از مرزدانه‌ها ($\Delta\sigma_{gb}$) و استحکام دهی ناشی از بافت بلوری می‌باشند. بنابراین استحکام تسلیم (σ_y) را می‌توان به صورت معادله (۱) در نظر گرفت [21,22]:

$$\sigma_y = \Delta\sigma_{gb} + M\tau_{tot} = \Delta\sigma_{gb} + M\left[\Delta\tau_0 + \Delta\tau_{ss} + \left(\Delta\tau_D^2 + \Delta\tau_{ppt}^2\right)^{1/2}\right] \quad (۱)$$

که در آن، M یک ضریب جهت‌گیری بلوری است که معمولاً همان ضریب تیلور می‌باشد، τ_{tot} همان تنش برشی بحرانی (CRSS) بوده و $\Delta\tau_0$ استحکام ذاتی فلز خالص است. بر اساس معادله (۱) و با علم به اینکه ریزساختار فلزات پایه مورد استفاده در این تحقیق بدون رسوب می‌باشد و نیز این که جوشکاری همزن اصطکاکی باعث تغییر در ترکیب شیمیایی فلزات نمی‌شود، مکانیزم‌های محتملی که باعث به وجود آمدن استحکام‌های متفاوت در فلز پایه و جوش شده‌اند را می‌توان از نوع $\Delta\tau_D$، $\Delta\sigma_{gb}$ و استحکام دهی ناشی از بافت بلوری دانست. افزایش استحکام ناشی از مرزدانه‌ها در یک نمونه تبلور مجدد یافته را می‌توان به صورت معادله (۲) بیان کرد [23]:

$$\Delta\sigma_{gb} = \alpha_2 Gb\left[(1 - f_{Re})\left(1/\delta\right) + f_{Re}\left(1/D\right)\right] \quad (۲)$$

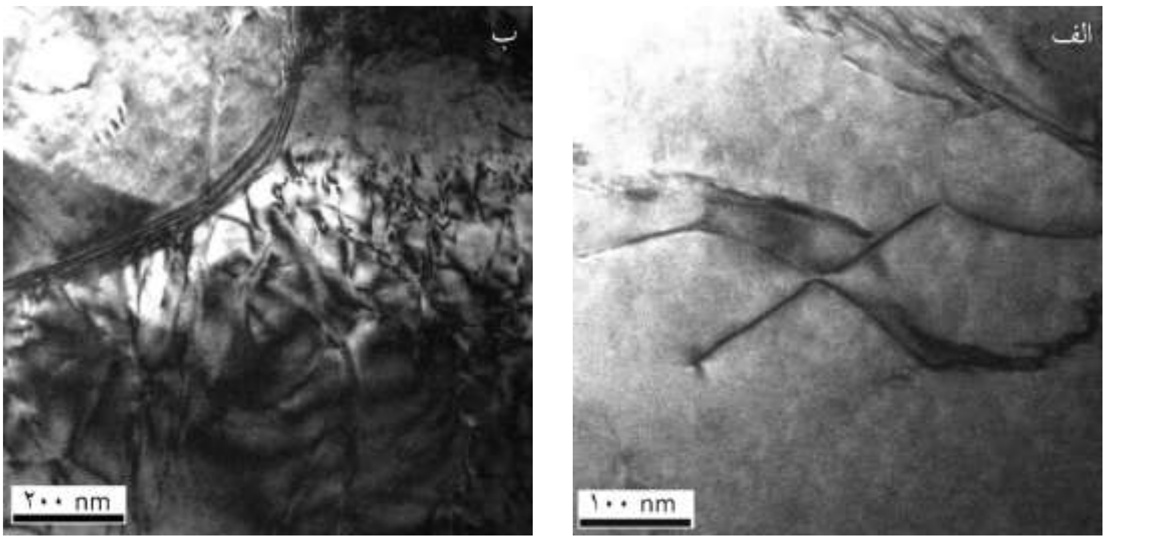
که در آن α_2 ثابت، G مدول برشی، b بردار برگرز، f_{Re} کسر حجمی دانه‌های تبلور مجدد یافته، δ اندازه دانه‌های فرعی در بخش تبلور مجدد نیافته و D اندازه متوسط دانه‌بندی دانه‌های تبلور مجدد یافته است. با توجه به ریزساختار فلزات پایه و ناحیه جوش (شکل‌های ۱ و ۲) و نیز معادله (۲) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار $\Delta\sigma_{gb}$ ناحیه جوش بیشتر از فلز پایه مربوطه خواهد بود. بعبارتی، بطور کمی اندازه دانه

متوسط در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی از ۱۸/٤ میکرومتر به ۳/۸ میکرومتر کاهش یافته است. همچنین، مقدار مرزهای بزرگ زاویه از ٦۷ درصد به ۸۵ درصد افزایش یافته است. این کاهش اندازه دانه و افزایش مرزهای زاویه بزرگ سبب ایجاد موانع در برابر حرکت نابجایی شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد.

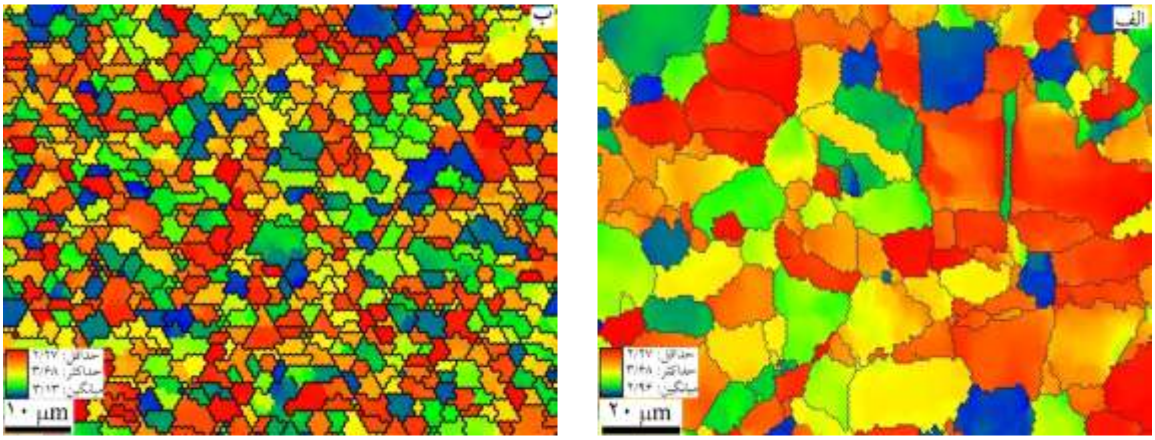
همچنین، افزایش مقدار تنش برشی CRSS ناشی از حضور نابجایی‌ها را به وسیله معادله (۳) می‌توان توضیح داد [24]:

$$\Delta\sigma_D = \alpha_1 G b \sqrt{\rho} \quad (۳)$$

که در آن α_1 عدد ثابت و ρ چگالی نابجایی‌ها می‌باشند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به ساختارهای نابجایی در فلز پایه و ناحیه همزده جوش در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵–الف)، آلیاژ پایه مورد استفاده دارای چگالی نابجایی کم می‌باشد. دلیل این موضوع به فرآیند آنیل ابتدایی در مرحله آماده‌سازی ورق برمی‌گردد، چرا که در اثر آنیل نابجایی‌ها تحت بازیابی قرار می‌گیرند. با توجه به شکل (۵–ب) می‌توان دریافت که در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی، چگالی نابجایی افزایش داشته است. بنابراین، مقدار $\Delta\tau_D$ برای ناحیه همزده جوش بیشتر از فلز پایه خواهد بود. در معادله (۱)، تاثیر بافت بلوری بر استحکام، در قالب ضریب تیلور یا همان M خود را نمایان می‌کند. برای بررسی تاثیر بافت بلوری بر سختی، مقدار ضریب تیلور برای نواحی فلز پایه و ناحیه همزده جوش نمونه به وسیله اطلاعات پراش الکترون‌های برگشتی و با در نظر گرفتن فشار تک‌محوری در راستای عمود بر سطح نمونه محاسبه شدند. همچنین، نقشه عدد تیلور مربوط به فلز پایه و ناحیه همزده جوش نیز به دست آمدند که در شکل (٦) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان دادند که عدد تیلور میانگین برای فلز پایه و ناحیه همزده جوش به ترتیب برابر با ۲/۹٦ و ۳/۱۳ می‌باشند که حاکی از افزایش آن در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی است. بنابراین، مقدار ضریب تیلور برای ناحیه جوش بیشتر از فلز پایه بوده که باعث افزایش سختی و استحکام جوش حاصل می‌شود. در نتیجه، کاهش اندازه دانه، افزایش چگالی نابجایی و تغییر بافت در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی باعث افزایش سختی در آلیاژ مونل ۴۰۰ می‌گردند.



شکل ۵ (الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نواحی فلز پایه، (ب) و همزده جوش



شکل ٦ (الف) نقشه عدد تیلور مربوط به نواحی فلز پایه، (ب) همزده جوش

نتیجه‌گیری

در این پژوهش جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ مونل ٤٠٠ با موفقیت انجام شده و تاثیر آن بر ریزساختار، زیرساختار و سختی آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است. جوشکاری همزن اصطکاکی باعث کاهش اندازه دانه آلیاژ مونل ٤٠٠ شده و به شدت مقدار مرزهای بزرگ زاویه را افزایش می‌دهد. مکانیزم حاکم بر تشکیل دانه‌های ناحیه جوشکاری را می‌توان از نوع تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در نظر گرفت که باعث از بین رفتن بافت تغییر شکل و تصادفی شدن بافت در ناحیه همزده جوش می‌شود. همچنین، در اثر جوشکاری همزن اصطکاکی، سختی آلیاژ افزایش می‌یابد. بررسی مکانیزم‌های استحکام بخشی نشان می‌دهند که مکانیزم‌های استحکام بخشی ناشی از مرزدانه، نابجایی و بافت در افزایش سختی حاکم هستند.

مراجع

1. Song, K.H., Chung, Y.D. and Nakata, K., "Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir lap jointed Monel 400 and Inconel 600", *Metals and Materials International*, Vol. 19, pp. 571-576, (2013).
2. Singh, V.B. and Gupta, A., "The electrochemical corrosion and passivation behaviour of Monel (400) in concentrated acids and their mixtures", *Journal of Materials Science*, Vol. 36, pp. 1433-1442, (2001).
3. Ojo, O.A., Richards, N.L. and Chaturvedi, M.C., "Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 641-646, (2004).
4. Huang, C.A., Wang, T.H., Han, W.C. and Lee, C.H., "A study of the galvanic corrosion behavior of Inconel 718 after electron beam welding", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 104, pp. 293-300, (2007).
5. Kim, J.-D., Kim, C.-J. and Chung, C.-M., "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 114, pp. 51-56, (2001).
6. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, pp. 1-78, (2005).

7. Amirafshar, A. and Pouraliakbar, H., "Effect of tool pin design on the microstructural evolutions and tribological characteristics of friction stir processed structural steel", *Measurement*, Vol. 68, pp. 111-116, (2015).
8. Golezani, A.S., Barenji, R.V., Heidarzadeh, A. and Pouraliakbar, H., "Elucidating of tool rotational speed in friction stir welding of 7020-T6 aluminum alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, pp. 1155-1164, (2015).
9. Asadi, P., Akbari, M., Besharati Givi, M.K. and Shariat Panahi, M., "Optimization of AZ91 friction stir welding parameters using Taguchi method", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 230, pp. 291-302, (2015).
10. Asadi, P., Besharati Givi, M.K. and Akbari, M., "Simulation of dynamic recrystallization process during friction stir welding of AZ91 magnesium alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, pp. 301-311, (2016).
11. Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A. and Nazari, E., "Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 166-173, (2012).
12. Heidarzadeh, A. and Saeid, T., "A comparative study of microstructure and mechanical properties between friction stir welded single and double phase brass alloys", *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 649, pp. 349-358, (2016).
13. Heidarzadeh, A. and Saeid, T., "Correlation between process parameters, grain size and hardness of friction-stir-welded Cu–Zn alloys", *Rare Metals*, Vol. pp. 1-11, (2016).
14. Heidarzadeh, A., Saeid, T. and Klemm, V., "Microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloy", *Materials Characterization*, Vol. 119, pp. 84-91, (2016).
15. Etter, A.L., Baudin, T., Fredj, N. and Penelle, R., "Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 445–446, pp. 94-99, (2007).
16. Fonda, R.W., Bingert, J.F. and Colligan, K.J., "Development of grain structure during friction stir welding", *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 243-248, (2004).
17. Ghosh, M., Kumar, K. and Mishra, R.S., "Analysis of microstructural evolution during friction stir welding of ultrahigh-strength steel", *Scripta Materialia*, Vol. 63, pp. 851-854, (2010).
18. Miura *, H., Sakai, T., Andiarwanto, S. and Jonas, J.J., "Nucleation of dynamic recrystallization at triple junctions in polycrystalline copper", *Philosophical Magazine*, Vol. 85, pp. 2653-2669, (2005).
19. Miura, H., Aoyama, H. and Sakai, T., "Effect of Grain-Boundary Misorientation on Dynamic Recrystallization of Cu-Si Bicrystals", *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 58, pp. 267-275, (1994).
20. Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H. and Jonas, J.J., "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions", *Progress in Materials Science*, Vol. 60, pp. 130-207, (2014).

21. Starink, M.J., Deschamps, A. and Wang, S.C., "The strength of friction stir welded and friction stir processed aluminium alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 377-382, (2008).
22. Starink, M.J. and Wang, S.C., "A model for the yield strength of overaged Al–Zn–Mg–Cu alloys", *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 5131-5150, (2003).
23. Xue, Z., Huang, Y. and Li, M., "Particle size effect in metallic materials: a study by the theory of mechanism-based strain gradient plasticity", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 149-160, (2002).
24. Wang, S., Zhu, Z. and Starink, M., "Estimation of dislocation densities in cold rolled Al- Mg- Cu- Mn alloys by combination of yield strength data, EBSD and strength models", *Journal of microscopy*, Vol. 217, pp. 174-178, (2005).